基于GEE的鄂尔多斯长时序植被NPP时空演变

刘　智[1,2]，　赵恒谦[1,2]，　皇甫霞丹[2]，　付含聪[2]，　王　盼[2]，
徐　飞[2]，　韩　添[2]

（1. 中国矿业大学(北京)内蒙古研究院，内蒙古 鄂尔多斯　017010；2. 中国矿业大学(北京)，
地球科学与测绘工程学院，北京　100083）

摘　要：利用Google Earth Engine（GEE）云计算平台，基于改进的CASA模型对鄂尔多斯2001—2020年间的植被净初级生产力（NPP）进行估算，并运用Sen斜率分析和MK趋势分析方法对NPP的时空变化进行深入分析，同时估算了其固碳能力。结果表明：（1）鄂尔多斯2001—2020年间植被NPP呈现明显的季节变化，最高值出现在7—8月，年平均NPP为78.04 g C·m^{-2}·a^{-1}，整体呈波动上升趋势。（2）在空间分布上，NPP存在明显的异质性，东北部较高，西北部较低，高值区集中在达拉特旗和准格尔旗，低值区则主要分布在杭锦旗。（3）生态工程的实施与NPP变化并不完全同步，整体呈现先慢后快的特点，大部分区域在2011年后NPP变化速率显著提升，但杭锦旗等生态环境恶劣地区的改善较慢，有一定滞后性。（4）鄂尔多斯固碳量在2011年呈大面积负值，但2020年固碳量空间异质性显著增强，东部较高、西部较低，杭锦旗西部恢复仍需加强，而达拉特旗固碳能力显著提升。

关键词：鄂尔多斯；Google Earth Engine；CASA模型；植被净初级生产力；固碳能力

陆地生态系统通过光合作用“吸入”二氧化碳（CO_2），并通过呼吸作用将碳（C）释放到大气中，因此，在全球碳循环和地球气候中发挥重要作用[1-2]。净初级生产力（Net Primary Productivity，NPP）是指绿色植物在单位时间、单位面积上所累积的有机物的数量，是光合作用所产生的有机物质总量中扣除自养呼吸部分后的剩余部分[3]。估算净初级生产力（NPP）及其年际变化对于理解生物圈与大气之间的反馈关系至关重要[4-6]。在过去的几十年里，陆地碳循环受到了学者们的极大关注。而遥感可以定量估算生态系统碳通量和碳储量，因此，已被广泛用于研究陆地碳循环[7]和监测全球变化对碳循环的影响[8]以及对气候的反馈[9]。

NPP空间分布格局可直观反映区域生态系统状况的空间差异，但容易受到气候变化、土地利用以及人为活动的影响[10]。近年来，遥感与地理信息技术的快速发展，极大推动了长时间序列NPP的动态监测研究[10-13]。近年来，对于NPP监测手段也由样地实测转向遥感模拟，应用较多的模型有Thornthwaite Memorial[14]、BIOME-BGC[15]、CASA[16]等，其中，光能利用率模型（CASA）综合考虑不同自然因素对植被NPP的影响，较适用于全球、全国、省域及县域等宏观尺度[17]。同时，随着Google Earth Engine云平台的出现与发展，有越来越多的学者利用GEE云平台的优势对NPP或其他参量进行长时间序列的研究分析[18-20]。

鄂尔多斯是京津风沙源治理工程[21-22]、三北防护林建设工程[23]等重点生态工程建设的重点区域，其植被生产力提升对于筑牢北方重要生态屏障具有重要意义。一方面，鄂尔多斯地处干旱半干旱区，其生态环境脆弱，主要表现为荒漠化和沙化土地集中，水土流失现象较为严重，局部地区的生态系统面临着退化的风险，修复难度大且过程缓慢，生态系统质量和稳定性提升存在的挑战难度较大[24]。另一方面，鄂尔多斯长期致力于生态工程修复工作，生态工程的建设周期较长、投资规模较大、影响范围较

收稿日期：2024-07-14；　**修订日期**：2024-12-17
基金项目：鄂尔多斯市科技重大专项（ZD20232317）；中国矿业大学（北京）越崎青年学者项目（2020QN07）
作者简介：刘智（1998-），女，硕士研究生，主要从事植被生态遥感研究. E-mail: lareinawl@163.com
通讯作者：赵恒谦. E-mail: zhaohq@cumtb.edu.cn

广,生态系统的恢复是一个漫长的演替过程[10],因此,其生态修复工作任务艰巨。鉴于此,鄂尔多斯的生态系统状况评估与生态恢复成效监测显得尤为重要。有众多学者曾针对此研究区进行过生态监测研究,例如植被覆盖变化特征分析[25-26]、植被覆盖度变化分析[27-28]、生态修复措施对草地群落及生物量的影响分析[29]。然而,这些研究主要关注植物覆盖率的改变和生态系统的发展方向,相比之下,关于鄂尔多斯在生态工程实施背景下的植物生产力和固碳能力研究较少。

因此,本研究基于Google Earth Engine (GEE) 遥感云平台,利用鄂尔多斯区域的遥感数据、气象数据、土地利用类型数据等,构建光能利用率CASA模型,计算研究区2001—2020年的NPP,并利用Sen斜率分析方法和MK趋势分析法对NPP进行时空变化分析,并计算研究区的固碳能力,从生态系统碳汇角度出发评估京津风沙源治理工程、三北防护林建设工程等重点生态工程建设的治理成效对鄂尔多斯的影响。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

鄂尔多斯位于内蒙古西南部,地处鄂尔多斯高原中心,介于37°35′24″~40°51′40″N,106°42′40″~111°27′20″E之间。鄂尔多斯地形复杂多样,包括高原、丘陵、沙地和平原,主要地貌类型为黄土丘陵和沙漠,境内有库布齐沙漠和毛乌素沙地分布;气候属于北温带半干旱大陆性气候区,冬季寒冷,夏季炎热,气候变化显著;矿产资源丰富,是中国重要的能源和化工基地,同时也是典型的生态脆弱区,生态工程的实施对改善当地生态环境具有重要意义(图1)。近年来,鄂尔多斯通过实施退耕还林还草、京津风沙源治理等生态工程,植被覆盖度显著提升,区域生态功能逐步恢复,是研究生态修复和碳汇能力的重要区域。

1.2 数据来源及处理

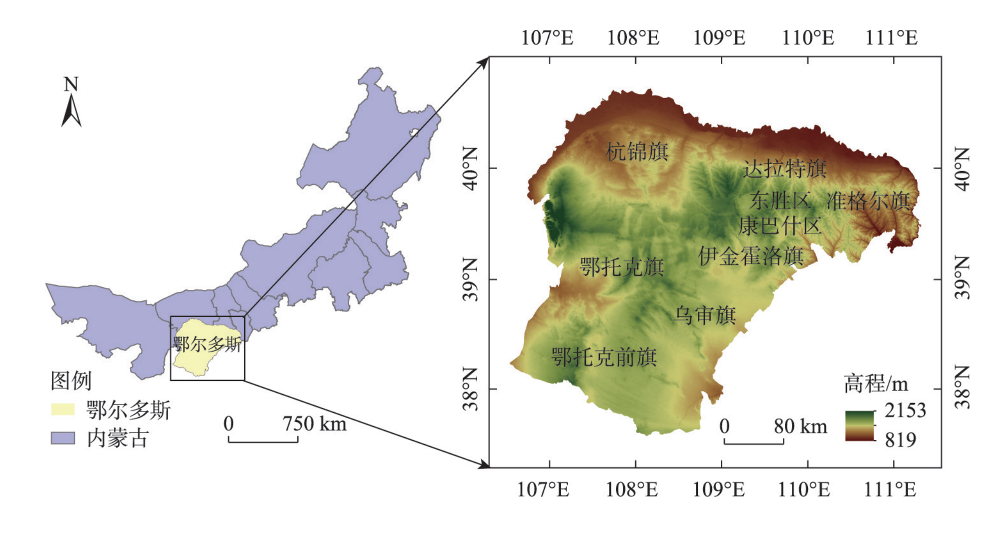
GEE是Google推出的一个基于云计算的行星级地理空间分析平台,存储了大量公开的地理空间数据集,它具备强大的计算能力,为大时空尺度的研究提供了便利[18]。本文所采用的数据均来源于GEE平台,包括土地利用、气温、降水、光合有效辐射(PAR)、光合有效辐射分量(FPAR)等数据,具体情况如表1所示。

MODIS FPAR数据集是具有高时间分辨率、高精度、高质量的数据集产品,能保证在较大的区域内数据集参数的综合质量高于用遥感影像间接计算的参数质量。为了保证不同数据源之间的几何匹配精度,本文在GEE平台中对研究区数据进行预处理,利用reproject算法将投影转化为EPSG:4326,并设置scale为500[18]。本研究技术路线如图2所示。

2 研究方法

2.1 CASA模型反演NPP

CASA模型强调气候条件和植被本身的光能利



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)1822,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Overview of the study area

表1　GEE云平台选取数据情况

Tab. 1　GEE platform selection of data

数据	所选产品	时间分辨率	空间分辨率
土地利用数据	MCD12Q1 V6.1 IGBP分类系统	1 a	500 m
PAR数据	MCD18C2 V6.1	3 h	500 m
FPAR数据	MOD15A2H V6.1	8 d	500 m
气象数据	ECMWF ERA5-Land	30 d	11132 m
蒸散量数据	MOD16A2 V6	8 d	500 m
验证数据	MOD17A3HGF V6.1	8 d	500 m

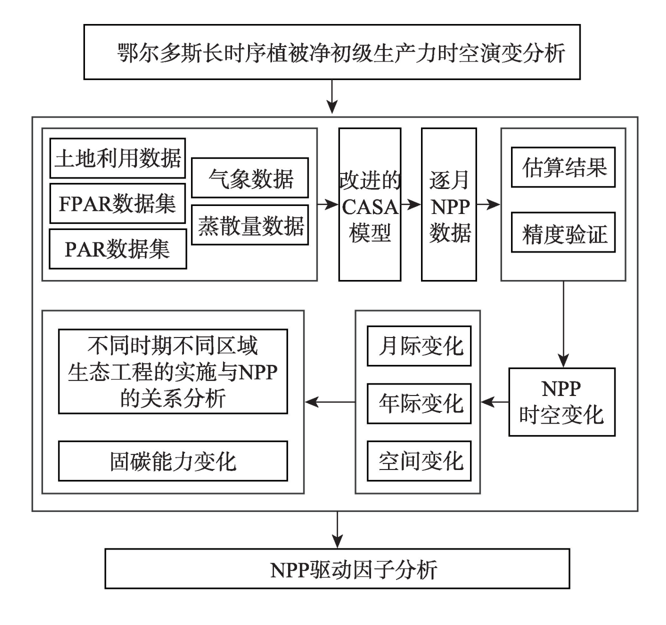


图2　技术路线图

Fig. 2　Technical flow chart

用效率,在估算陆地生态系统NPP中得到广泛的应用[30-31]。计算公式为:

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\times\varepsilon(x,t) \tag{1}$$

式中: $\mathrm{APAR}(x,t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}}$); $\varepsilon(x,t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率($\mathrm{g\ C\cdot MJ^{-1}}$)。

(1) APAR计算

本文对原模型中光合有效辐射APAR的计算方式进行了改进,原模型太阳总辐射SOL计算较为复杂,在GEE中很难实现,因此,在本研究中,使用PAR和FPAR计算得到,公式如下:

$$\mathrm{APAR}(x,t)=\mathrm{PAR}(x,t)\times\mathrm{FPAR}(x,t) \tag{2}$$

式中: $\mathrm{PAR}(x,t)$ 为 t 月在像元 x 处的总光合有效辐射($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}}$); $\mathrm{FPAR}(x,t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例。

(2) 实际光能利用率计算

实际光能利用率 ε 主要受温度和水分的胁迫作用,计算公式为:

$$\varepsilon(x,t)=Ws\times T_{\varepsilon1}\times T_{\varepsilon2}\times\varepsilon_{\max} \tag{3}$$

其中:

$$T_{\varepsilon1}=0.8+0.02\times T_{\mathrm{opt}}(x)-0.0005\times\left(T_{\mathrm{opt}}(x)\right)^2 \tag{4}$$

$$T_{\varepsilon2}=\left\{\frac{C}{\left[1+\mathrm{e}^{\left(0.2\times\left(T_{\mathrm{opt}}-10-T\right)\right)}\right]}\right\}\times\left\{\frac{1}{\left[1+\mathrm{e}^{\left(0.3\times\left(-T_{\mathrm{opt}}-10+T\right)\right)}\right]}\right\} \tag{5}$$

式中: $T_{\varepsilon1}$ 和 $T_{\varepsilon2}$ 分别为低温和高温胁迫因子; $T_{\mathrm{opt}}(x)$ 为植被年内NDVI达到最大时当月的平均气温(℃),当 $T(x,t)<10$ ℃时, $T_{\mathrm{opt}}(x)$ 取值为0; C 为常数,在本研究中取1.1814。

$$Ws=0.5+0.5\times\frac{EET}{EEP} \tag{6}$$

式中: Ws 为水分胁迫因子,反映水分条件的影响; EET 为区域实际蒸散量; EEP 为区域潜在蒸散量。

$\varepsilon_{\max}$ 为理想条件下最大光能利用率($\mathrm{g\ C\cdot MJ^{-1}}$),取值因植被类型而异。本文参考前人的研究[32],对原模型中的 $\varepsilon_{\max}$ 统一为0.389 $\mathrm{g\ C\cdot MJ^{-1}}$ 进行了调整,具体见表2所示。

表2　不同土地覆盖类型的最大光能利用率

Tab. 2　Maximum light energy utilization for different land cover types

土地覆盖类型	最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ /($\mathrm{g\ C\cdot MJ^{-1}}$)
常绿针叶林	0.389
常绿阔叶林	0.985
落叶针叶林	0.485
落叶阔叶林	0.692
灌木	0.429
其他	0.542

2.2　变化趋势分析

Sen斜率[33]是地学领域较为成熟的一种统计方法,主要用于分析各要素的变化趋势和幅度,该方法以样本在不同长度的变化率构造秩序列,基于一定显著性水平进行统计量检验,并以斜率的中值大小判断时间序列变化趋势及幅度。Sen斜率能降低或避免数据缺失及异常对统计结果的影响,公式为:

$$\mathrm{Sen}_{ij}=\mathrm{Median}\left[\frac{x_j-x_i}{j-i}\right],\ \forall j>i \tag{7}$$

式中：Sen_{ij} 为Sen斜率；x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 时刻的序列值，$1<i<j<n$，n 为序列长度。

Mann-Kendall(MK)检验是一种非参数检验法，其不需要测量值服从正态分布，不受缺失值和异常值的影响，适用于长时间序列数据的趋势显著检验，目前，已被广泛应用于气象、水文、植被等研究中[34-35]。其计算方法如下：

假定 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为时间序列变量，检验的统计量 S 计算公式为：

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} f\left(x_j-x_i\right) \tag{8}$$

$$f\left(x_j-x_i\right)=\begin{cases}+1,\ x_j-x_i>0\\ 0,\ x_j-x_i=0\\ -1,\ x_j-x_i<0\end{cases} \tag{9}$$

使用检验统计量 Z 进行趋势检验，计算公式为：

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}},\ S>0\\ 0,\ S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}},\ S<0\end{cases} \tag{10}$$

式中：S 服从正态分布；$\mathrm{Var}(S)$ 为方差。趋势显著性的判断如表3所示。

表3 Mann-Kendall检验趋势类别

Tab. 3 Mann-Kendall test for trend categories

Sen_{ij}	Z	趋势类别	趋势特征
$\mathrm{Sen}_{ij}>0$	$Z>2.58$	4	极显著增加
	$1.96<Z\leq 2.58$	3	显著增加
	$1.65<Z\leq 1.96$	2	微显著增加
	$Z\leq 1.65$	1	不显著增加
$\mathrm{Sen}_{ij}=0$	$Z\in R$	0	无变化
$\mathrm{Sen}_{ij}<0$	$Z\leq 1.65$	−1	不显著减少
	$1.65<Z\leq 1.96$	−2	微显著减少
	$1.96<Z\leq 2.58$	−3	显著减少
	$Z>2.58$	−4	极显著减少

2.3 固碳能力估算

固碳功能是生态系统吸收大气中的二氧化碳合成有机质，将碳固定在植物或土壤中，降低大气中二氧化碳浓度，减缓温室效应的功能。以固碳量作为生态系统固碳功能的评估指标，由净初级生产力(NPP)减去异养呼吸(即土壤呼吸)消耗得到。

$$Q_{CO_2}=\frac{M_{CO_2}}{M_C}\times \mathrm{NEP}\times A \tag{11}$$

$$\mathrm{NEP}=\mathrm{NPP}-RS \tag{12}$$

$$RS=0.22\times\left[\exp(0.0913T)+\ln(0.3145R+1)\right]\times 30\times 46.5\% \tag{13}$$

式中：Q_{CO_2} 为固碳量；A 为面积；$\frac{M_{CO_2}}{M_C}$ 为C转换为 CO_2 的系数，即44/12；NEP为净生态系统生产力；RS 为土壤呼吸消耗碳量($\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}}$)；$T$ 为月平均气温(℃)；R 为月累积降水量(mm)。

3 结果与分析

3.1 NPP时空变化分析

由图3可知，从时间变化上，在2001—2020年期间，鄂尔多斯年内植被NPP的变化有明显的季节变化趋势，最大值发生在7—8月，平均NPP为18.70 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot month^{-1}}$，最大可达26.37 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot month^{-1}}$(2012年8月)，最小值发生在2011年1月，NPP仅为0.03 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot month^{-1}}$，NPP多年月均值为6.51 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot month^{-1}}$。就年际特征来看，鄂尔多斯2001—2020年NPP的平均值为78.04 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}}$，2019年最大为97.22 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}}$，2001年最小为50.456 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}}$。其中前10 a(2001—2010年)NPP年平均值为69.78 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}}$，后10 a(2011—2020年)NPP年平均值为86.30 $\mathrm{g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}}$。总体上来看，在2001—2020年，鄂尔多斯的NPP总体都呈现增加趋势。

由图4可以看出，鄂尔多斯年NPP平均值大多

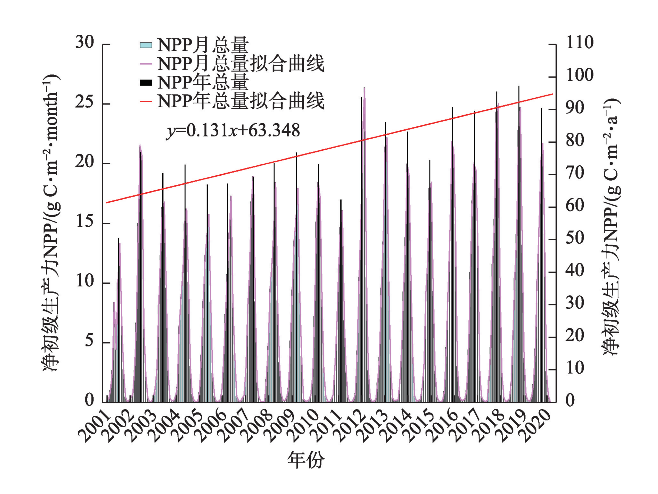


图3 2001—2020年研究区NPP时间变化趋势

Fig. 3 Time variation trend of NPP in the study area from 2001 to 2020

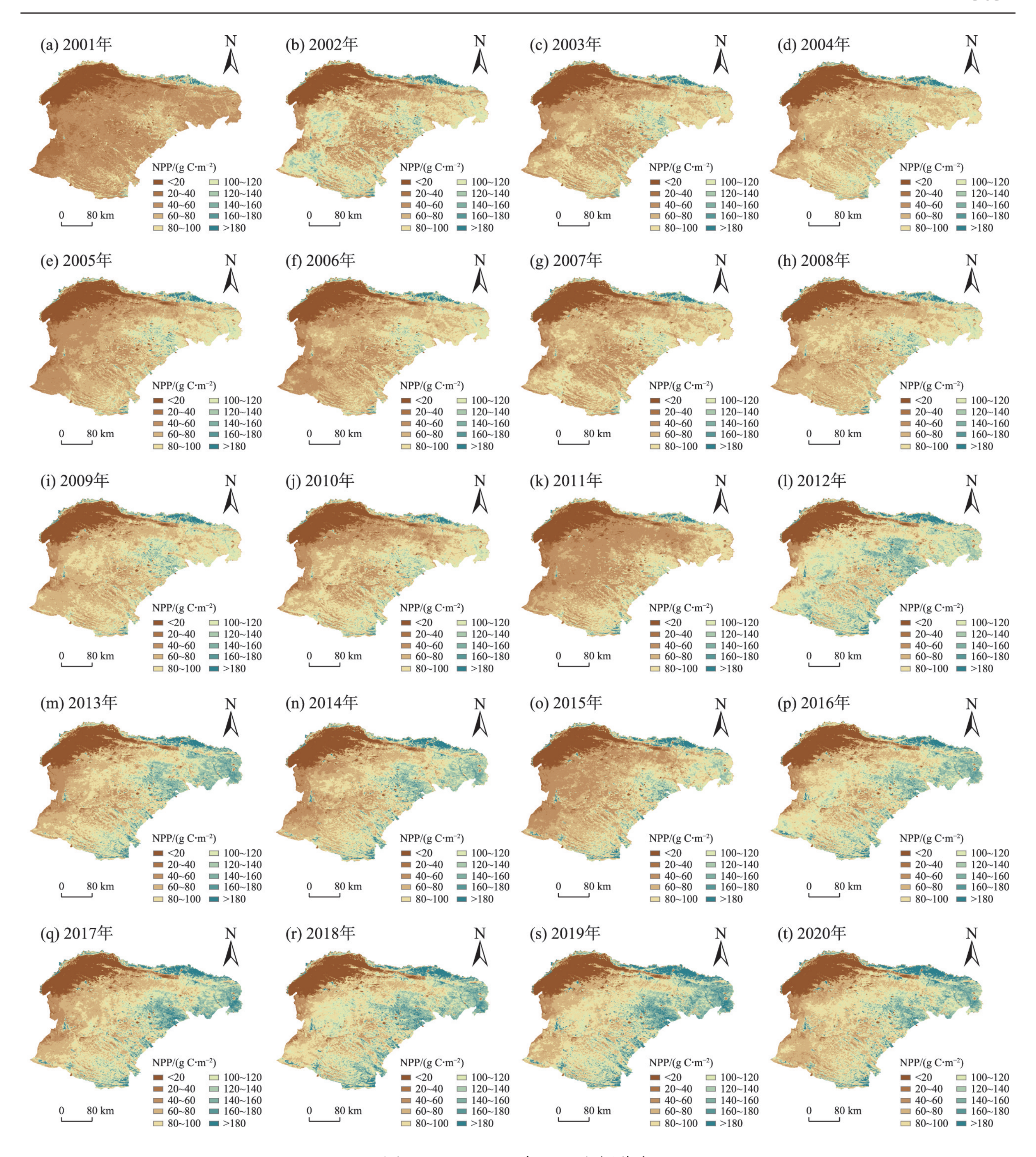


图4　2001—2020年NPP空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of NPP from 2001 to 2020

分布在20~180 g C·m^{-2}·a^{-1}之间,空间分布上主要呈现东南部高,西北部低的特点。其中NPP高值区主要分布在达拉特旗及准格尔旗,这些区域的水热条件较好,植被覆盖度较高,此外,由于黄河的灌溉作用,研究区西部内蒙古河套平原NPP明显高于其周边地区。NPP低值则主要分布在区域西北部,这些地区沙化土地广布,植被覆盖度较低,治理难度大,气候干旱少雨,水分不足,对于这些地方的生态环境改善具有较大的挑战。

3.2 NPP变化速率及变化趋势空间分布特征分析

由图5可知,NPP变化速率整体呈现东北高、西北低的分布特征。除了鄂尔多斯西北和西南地区

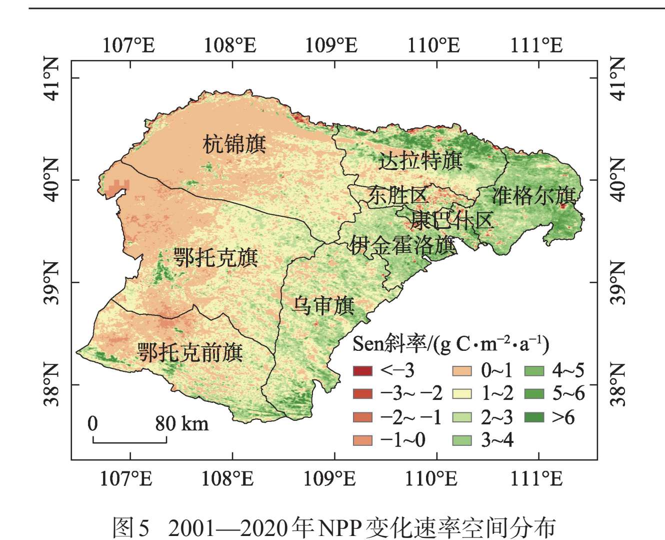


图5 2001—2020年NPP变化速率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the rate of change of NPP from 2001 to 2020

变化较慢，且有一定程度的负增长之外，大部分区域的NPP变化较快。鄂尔多斯2001—2020年平均NPP变化速率为2.04 g C·m^{-2}·a^{-1}。

鄂尔多斯2001—2020年NPP的变化趋势空间分布如图6所示，NPP变化趋势以极显著增加和不显著增加为主，分别占鄂尔多斯总面积的53.82%和27.80%，呈减少趋势的地区面积占2.71%，其中不显著减少(2.28%)的面积占比更高。这一变化趋势整体呈现出东部区域极显著增加，而西北部则主要表现为不显著增加的特点。由图还可以看出，鄂尔多斯西南部地区有一定程度的减少趋势。NPP极显著增加区主要集中在达拉特旗、准格尔旗、伊金霍洛旗、乌审旗等区域；不显著增加区主要分布在杭锦旗、鄂托克旗的西部及鄂托克前旗的中部地区。

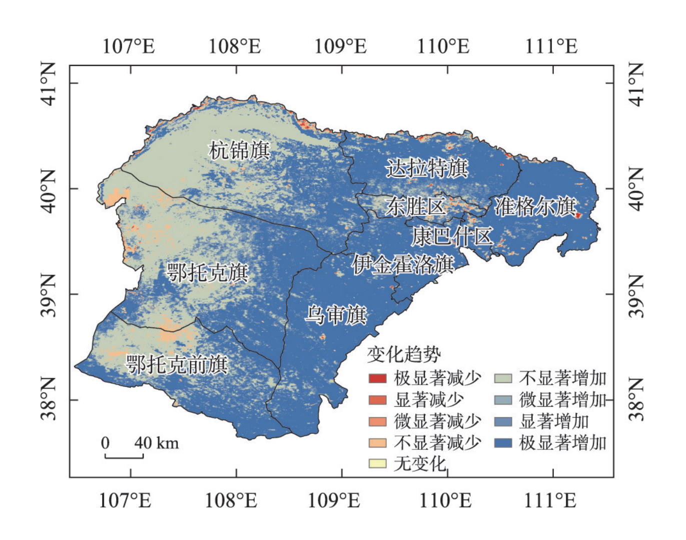


图6 2001—2020年NPP变化趋势空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of NPP trends from 2001 to 2020

3.3 NPP对生态工程实施的响应

研究发现，京津风沙源治理工程一期工程(2001—2010年)、二期工程(2011—2020年)、“三北”防护林四期工程(2001—2010年)、五期工程(2011—2020年)的实施与NPP变化并不同步(图7、图8)。在2001—2010年期间，尽管这些治理工程开始实施，鄂尔多斯地区的年NPP值并未显著增加，许多区域的植被尚未完全恢复或生长尚不稳定，生态系统的生产力仍在逐步提高，这反映出生态修复过程中存在明显的滞后效应。然而，自2011年起，随着治理措施的逐步落实和生态环境的改善，年NPP值呈现出显著的增加趋势。这一现象说明，尽管治理工程在实施初期未能立即提升生态系统的生产力，但其长期累积效应在后期逐渐显现。受沙漠化和气候变化影响显著的鄂尔多斯，生态治理的成果需要时间来反映，凸显了持续监测和评估的重要性。

如图7、图8所示，2001—2010年和2011—2020年杭锦旗、鄂托克旗、鄂托克前旗、乌审旗南部等区域有较大范围的不显著增加趋势，NPP变化速率在2001—2010年呈现负增长，在2011—2020年期间NPP的增加幅度相对较小且变化速率平稳。这可能是由于2001—2010年期间，虽然实施了一系列生态治理工程，但由于初期措施的实施效果滞后，生态系统的恢复尚未充分显现。鄂尔多斯东部地区的准格尔旗、伊金霍洛旗、达拉特旗等区域在2001—2010年和2011—2020年NPP呈现明显增加趋势，特别是在2011—2020年间，其NPP增加较快，这主要得益于生态工程的实施，通过植树造林、草地恢复和水土保持等措施，促进了植被的生长和恢复，改善了当地的生态环境，增强了生态系统的生产力。

通过对2001—2020年鄂尔多斯各区域NPP变化的分析(图9)可以看出，鄂尔多斯各行政区的治理措施和生态环境状况对NPP变化速率产生了显著影响。伊金霍洛旗、康巴什区、准格尔旗和达拉特旗的NPP在2011—2020年期间均出现了明显的增长，尤其是康巴什区和达拉特旗，康巴什区年均NPP从1.31 g C·m^{-2}·a^{-1}增至4.02 g C·m^{-2}·a^{-1}，达拉特旗年均NPP从1.05 g C·m^{-2}·a^{-1}增至3.72 g C·m^{-2}·a^{-1}。然而，杭锦旗和鄂托克旗的NPP变化幅度相对较小，这主要与它们所处的生态环境较为恶劣有关。尤

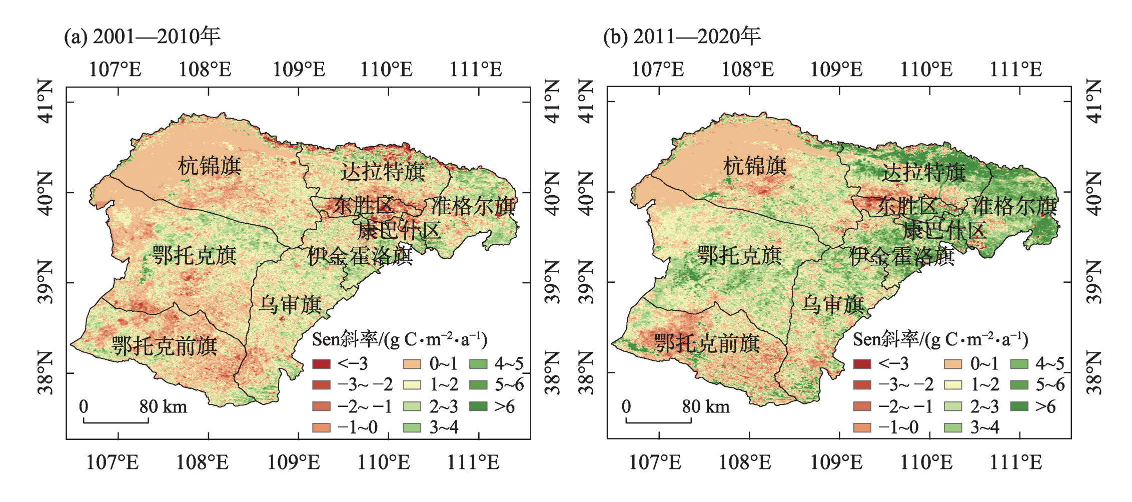


图7　不同时间段内NPP变化速率空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of NPP change rate in different time periods

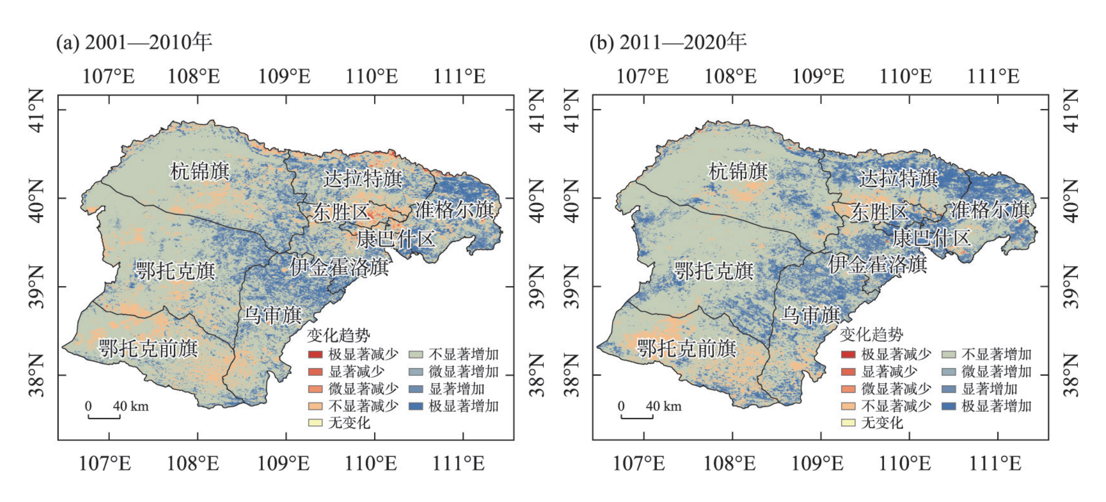


图8　不同时间段内NPP变化趋势空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of NPP variation trend in different time periods

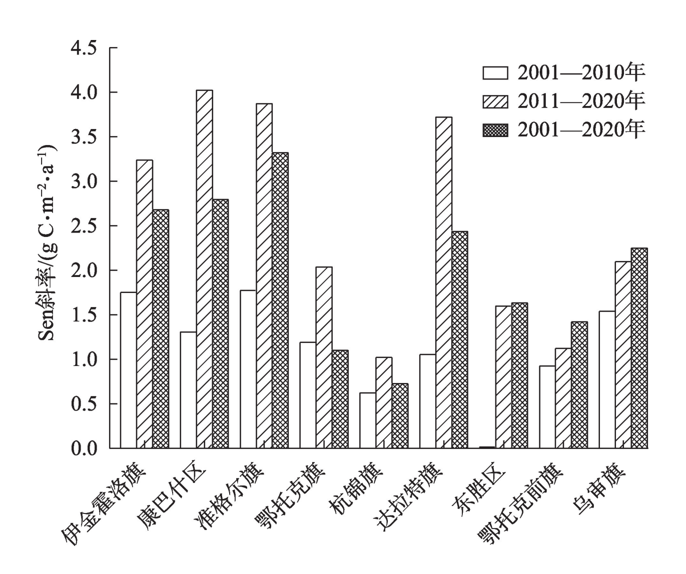


图9　不同区域、不同时间段内NPP变化速率

Fig. 9　Variability in NPP change rates across different regions and time periods

其是杭锦旗的年均NPP仅为0.62 g C·m^{-2}·a^{-1}。此外,东胜区和鄂托克前旗的NPP变化速率相对缓慢,东胜区的年均NPP仅为1.63 g C·m^{-2}·a^{-1},鄂托克前旗的年均NPP仅为1.42 g C·m^{-2}·a^{-1}。

3.4　固碳能力分析

从图10a中可以看出,鄂尔多斯2011年单位面积固碳量大面积呈现负值,这是由于京津风沙源治理工程一期工程(2001—2010年)、"三北"防护林四期工程(2001—2010年)等生态工程的实施具有滞后性,其生态系统固碳能力较弱。到2020年(图10b),单位面积固碳量空间异质性显著增强,整体呈现出东部高,西部低的特点,与NPP的空间分布情况相似。

具体来看,杭锦旗西部固碳量最低,2011年固碳量为−597.46 g C·m^{-2}·a^{-1},2020年虽有所改善,但

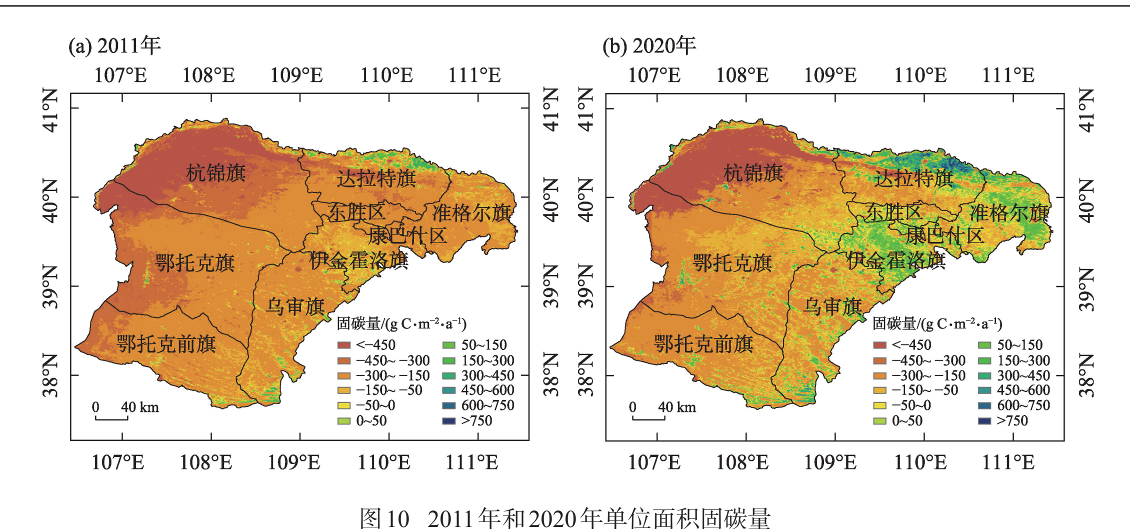


图10 2011年和2020年单位面积固碳量

Fig. 10 Carbon sequestration per unit area in 2011 and 2020

仍为−592.10 g C·m^{-2}·a^{-1}，这表明该区域的生态恢复仍面临挑战。相比之下，达拉特旗北部固碳量最高，2011年固碳量为524.05 g C·m^{-2}·a^{-1}，2020年达到了972.61 g C·m^{-2}·a^{-1}。

4 讨 论

鄂尔多斯北部有库布齐沙漠，南部有毛乌素沙地，东部为丘陵沟壑区，西部为波状高原硬梁区，各个地级市所实施的治理方案不同，进而每个地级市的NPP变化速率也有显著差异。对于杭锦旗和鄂托克旗西部区域的NPP变化速率较慢且有一定程度的负增长，这主要是受库布齐沙漠的影响较大，由于沙漠化和水资源匮乏，植被生长受到抑制，其地表植被覆盖率较低，从而限制了该区域NPP的增加。对于鄂尔多斯东部的准格尔旗、伊金霍洛旗、达拉特旗北部等区域NPP变化速率较快且呈现出极显著增加的趋势，这主要是由于这些区域位于丘陵沟壑区，土壤较为肥沃，降水量相对较高，为植物生长提供了良好的生态条件。此外，丰富的草原和灌木植被覆盖促进了生态系统的生产力，加之地方政府实施的生态工程、生态恢复政策和土地利用优化措施，也为提高该区域的NPP贡献了积极因素，使得NPP在2001—2020年间出现显著增长。

在2001—2020年，鄂尔多斯地区的净初级生产力(NPP)表现出显著的时空变化趋势。NPP在季节上呈现明显的波动，最高值出现在夏季，且年际变化显示出整体上升趋势，特别是后10 a NPP的年均值明显高于前10 a。这种变化可能与气候条件的改善、植被覆盖的增强以及地方政府实施的生态治理措施密切相关。然而，NPP的空间分布特征也揭示了区域间的差异，东北部NPP较高，西北部则面临严峻的生态挑战，反映了不同生态工程实施效果的复杂性。尽管生态工程在实施初期未能立即提升NPP，研究结果显示其长期效应在后期逐渐显现，突显了治理措施的滞后性，说明生态恢复和固碳能力的提升需要时间和持续的努力。固碳量的分析同样表明，区域间存在显著的空间异质性，治理效果不均衡，部分区域依然面临固碳能力低下的挑战。因此，未来研究应关注针对不同区域的定制化治理策略，以优化生态工程的效果，并通过长期监测评估实现生态系统服务的持续提升。本研究的结果与韩梅等[36]、张丹丹[37]、黄露等[38]、田智慧等[39]、常屹冉等[29]、王俊枝等[26]研究结果一致。

已有研究表明，全球气候变化背景下水热条件对植被乃至生态系统的胁迫更加明显，气候变化对NPP的影响存在区域差异[40−41]，而在鄂尔多斯的不同区域，影响植被覆盖的驱动因子也并不相同[42]。因此，本研究为了进一步探讨生态工程对鄂尔多斯植被NPP的影响，计算了研究区2001—2020年逐年的平均降水量及平均气温(图11)，并与NPP进行了相关性分析。发现在研究时段内，研究区的年平均气温与NPP的相关系数为0.1166，年平均降水量与NPP的相关系数为0.6296。可以发现，降水量对NPP的影响较为显著，这说明降水量的变化对净初级生产力(NPP)和植被生长产生显著影响。这主要与鄂尔多斯所处的沙漠地质环境有关，沙漠土壤的水分保持能力通常较差，在降水不足的情况下，土壤中的水分容易蒸发，进一步限制了植被的生长，

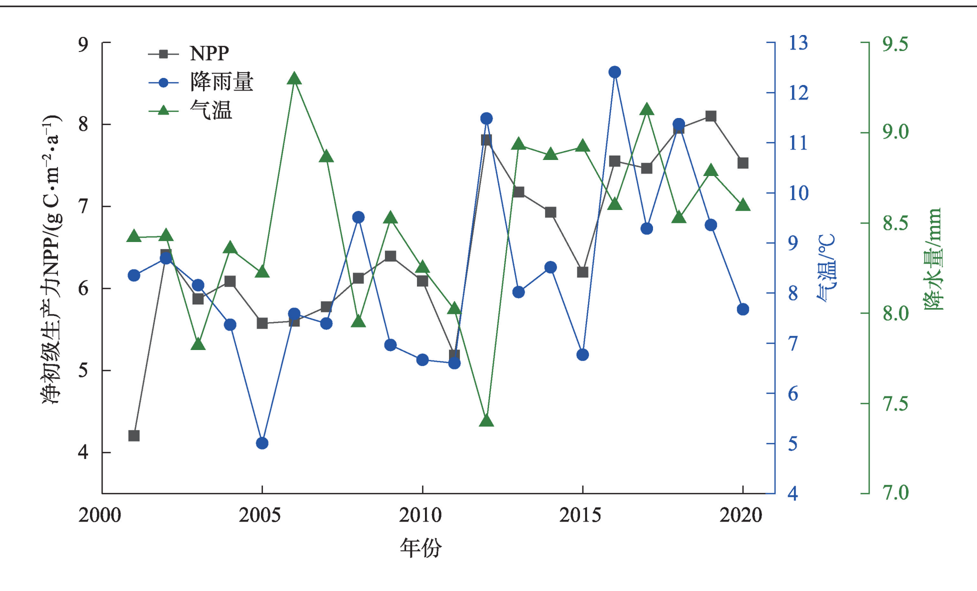


图11　2001—2020年NPP与气象数据变化

Fig. 11　Changes in NPP and meteorological data from 2001 to 2020

进而导致NPP不增长或增长缓慢。相比之下,年平均气温与NPP的关系较弱,这表明气温变化对NPP的影响相对有限。

总体上看,在本研究区域内,NPP的增长不仅受降水和温度变化的影响,还与生态工程的实施效果密切相关。尽管降水量对NPP的影响显著,生态工程的作用同样不可忽视。生态工程通过改善土壤质量、增加植被覆盖度以及提升水分利用效率,显著增强了生态系统的生产力。这些工程可能通过增加土壤有机质和改善水土保持,促进了植物的生长和生存,从而推动了NPP的提高。此外,生态工程的实施还能够改善区域的微气候条件,如通过增加植被覆盖来降低土壤温度和蒸发速率,进一步促进植被生长。因此,NPP的增长可以视为降水、气温与生态工程综合作用的结果,强调了在沙漠地带采取综合管理措施的重要性。此外,简单的气温和降水相关性分析无法全面反映气候对NPP的影响,今后还应综合考虑多种气候因子以及更长时间尺度上的变化来得出更加全面的结论。

通过与MODIS数据产品的NPP均值进行对比验证(如图12),可以得出改进后的CASA模型与MODIS产品的NPP值存在相关性,R^2为0.96,二者具有良好的一致性,反映出改进后的CASA模型可以有效反演鄂尔多斯植被NPP,可用于鄂尔多斯的植被NPP变化分析。此外,光能利用率模型本身具有极大的不确定性[43-45],虽然本文使用的CASA模型为经过简单改进后的模型,但计算得到的NPP结果仍然存在不确定性。本研究为了得到研究区综合情况较好的参数结果,直接使用了GEE云平台中的多个MODIS数据集产品,如果需要得到更精确的NPP结果,首先可以针对研究区的实际情况对光能利用率模型进行改进,得到适用于研究区的改进的CASA模型,其次可以使用空间分辨率更高的遥感影像,通过计算得到相关参数结果,再代入模型中进行计算。本研究所使用的模型方法是综合考虑了计算效率和数据质量的情况下选择的较优方法,本研究也证明了GEE云平台在计算长时间序列时空数据时具有强大的优势。

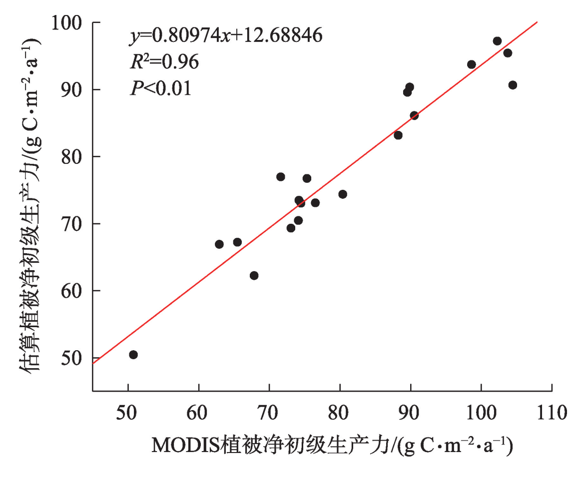


图12　CASA模型精度验证

Fig. 12　CASA model accuracy verification results

5 结 论

本研究对鄂尔多斯2001—2020年NPP进行时空动态监测，利用GEE遥感云平台分析了NPP的变化特征及其与生态工程实施的关系，并探讨了不同区域不同时期内NPP变化和固碳能力的空间分布特征。主要结论如下：

（1）在时间变化上，2001—2020年鄂尔多斯植被NPP有明显的季节变化趋势，最大值发生在7—8月，平均NPP为18.70 $g\ C\cdot m^{-2}\cdot month^{-1}$，总体呈波动上升趋势，年平均值为78.04 $g\ C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。鄂尔多斯植被NPP空间分布上呈现明显的空间异质性，整体呈现东北部高，西北部低的特点，NPP高值区主要分布在达拉特旗及准格尔旗，NPP低值则主要分布在杭锦旗。

（2）NPP变化速率的空间分布显示出东北部高、西北部低的特征，整体平均变化速率为2.04 $g\ C\cdot m^{2}\cdot a^{-1}$。大部分地区的NPP变化较快，只有西北和西南部分区域呈现负增长。此外，极显著增加区主要集中在达拉特旗、准格尔旗等地，而不显著增加的地区多分布于杭锦旗和鄂托克旗，反映出生态工程的实施效果在不同区域有差异。

（3）生态治理工程的实施与NPP变化并不完全同步。2001—2010年期间，尽管治理措施开始实施，但NPP并未显著提升，反映出生态修复的滞后效应。自2011年起，随着治理措施的有效落实，NPP显著上升，凸显了长期生态治理的重要性。

（4）固碳量的空间分布在2011年显示出大面积负值，主要由于早期生态工程的滞后影响。在2020年，固碳量的空间异质性显著增强，呈现出东部高、西部低的特征。杭锦旗西部的固碳量仍然较低，表明该区域的生态恢复工作亟待加强；而达拉特旗的固碳能力则显著提升，显示出良好的生态恢复效果。

参考文献(References)：

[1] Xiao J F, Chevallier F, Gomez C, et al. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111383.

[2] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在"碳中和"目标中的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(7): 1419–1426. [Piao Shilong, Yue Chao, Ding Jinzhi, et al. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the 'carbon neutrality' strategy [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(7): 1419–1426.]

[3] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296–300. [Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 296–300.]

[4] Cao S, Sanchez-Azofeifa G A, Duran S M, et al. Estimation of aboveground net primary productivity in secondary tropical dry forests using the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(7): 075004.

[5] Bulut S, Günlü A, Şatr O. Estimating net primary productivity of semi-arid Crimean pine stands using biogeochemical modelling, remote sensing, and machine learning[J]. Ecological Informatics, 2023, 76: 102137.

[6] Xiao F J, Liu Q F, Xu Y Q. Estimation of terrestrial net primary productivity in the Yellow River Basin of China using light use efficiency model[J]. Sustainability, 2022, 14(12): 7399.

[7] 陶波, 葛全胜, 李克让, 等. 陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(5): 564–575. [Tao Bo, Ge Quansheng, Li Kerang, et al. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem[J]. Geographical Research, 2001, 20(5): 564–575.]

[8] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO_2失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 594–602. [Fang Jingyun, Piao Shilong, Zhao Shuqing. The carbon sink: The role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the Northern Hemisphere[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25(5): 594–602.]

[9] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 175–188. [Xu Xiaofeng, Tian Hanqin, Wan Shiqiang. Climate warming impacts on carbon cycling in terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 175–188.]

[10] 王爽, 李庆旭, 张彪. 锡林郭勒盟净初级生产力时空变化及其气候影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 825–834. [Wang Shuang, Li Qingxu, Zhang Biao. Spatiotemporal variation of net primary productivity and its climatic driving factors in Xilingol League[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 825–834.]

[11] 郭连发, 来全, 伊博力, 等. 2000—2014年呼伦贝尔沙地河流湿地植被NPP时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 267–272. [Guo Lianfa, Lai Quan, Yi Boli, et al. Spatiotemporal changes of net primary productivity of river wetland and its driving factors in Hulun Buir Sandy Land in 2000–2014[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 267–272.]

[12] 任丽雯, 王兴涛, 刘明春, 等. 石羊河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 818–828. [Ren Liwen, Wang Xingtao, Liu Mingchun, et al. Temporal and spatial changes and the driving factors of vegetation NPP in Shiyang Riv-

er Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 818-828.]

[13] 潘竟虎, 李真. 2001—2012年西北干旱区植被净初级生产力时空变化[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3333-3340. [Pan Jinghu, Li Zhen. Temporal spatial change of vegetation net primary productivity in the arid region of Northwest China during 2001 and 2012[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3333-3340.]

[14] 刘一丹, 姚晓军, 李宗省, 等. 气候变化和土地利用覆盖变化对河西地区植被净初级生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 169-180. [Liu Yidan, Yao Xiaojun, Li Zongxing, et al. Impacts of climate change and land use/cover change on the net primary productivity of vegetation in Hexi Region, Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 169-180.]

[15] Li C H, Sun H, Wu X D, et al. An approach for improving soil water content for modeling net primary production on the Qinghai-Tibetan Plateau using Biome-BGC model[J]. Catena, 2020, 184: 104253.

[16] Potter C, Randerson J, Field C, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.

[17] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(3): 300-307.]

[18] 张祯祺, 蔡惠文, 张平平, 等. 基于GEE遥感云平台的三江源植被碳源/汇时空变化研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 231-242. [Zhang Zhenqi, Cai Huiwen, Zhang Pingping, et al. A GEE-based study on the temporal and spatial variations in the carbon source/sink function of vegetation in the Three-River Headwaters region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 231-242.]

[19] 郭睿妍, 田佳, 杨志玲, 等. 基于GEE平台的黄河流域森林植被净初级生产力时空变化特征[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5437-5445. [Guo Ruiyan, Tian Jia, Yang Zhiling, et al. Spatio-temporal variation characteristics of forest net primary productivity in the Yellow River Basin based on Google Earth Engine cloud platform[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5437-5445.]

[20] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于GEE云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1439-1450. [Li Jing, Yan Xingguang, Yan Xiaoxiao, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1439-1450.]

[21] 刘彦平, 张国红, 杨跃军, 等.《京津风沙源治理工程二期规划》战略调整[J]. 林业调查规划, 2013, 38(6): 92-95. [Liu Yanping, Zhang Guohong, Yang Yuejun, et al. Strategic adjustment on the Second Phase of Planning of Beijing-Tianjin Sandstorm-Control Project[J]. Forest Inventory and Planning, 2013, 38(6): 92-95.]

[22] 赵恒谦, 刘轩绮, 刘帮, 等. 京津风沙源区NPP时空变化及其对治理工程实施的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2406-2419. [Zhao Hengqian, Liu Xuanqi, Liu Ge, et al. Spatio-temporal variation of net primary productivity in the Beijing-Tianjin sandstorm source area and its response to the implementation of control projects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2406-2419.]

[23] 弥宏卓, 于振海, 白艳, 等. 内蒙古自治区"三北"防护林体系建设工程状况分析[J]. 内蒙古林业调查设计, 2023, 46(1): 1-4, 29. [Mi Hongzhuo, Yu Zhenhai, Bai Yan, et al. Analysis of Three-North Forest Shelterbelt System construction program in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2023, 46(1): 1-4, 29.]

[24] 鄂尔多斯市人民政府. 鄂尔多斯市国土空间生态修复规划（2021—2035年）的通知[EB/OL]. https://www.ordos.gov.cn/zzms/slh_zcwjx/202306/t20230609_3438197.html, 2023-05-12. [Ordos Municipal People's Government. Notice of the ecological restoration planning of land space in Ordos City (2021-2035) [EB/OL]. https://www.ordos.gov.cn/zzms/slh_zcwjx/202306/t20230609_3438197.html, 2023-05-12.]

[25] 滑永春, 萨如拉, 王冰. 内蒙古草原NPP时空变化及驱动力[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 130-139. [Hua Yongchun, Sa Rula, Wang Bing. Spatial and temporal variation of grassland NPP and its driving forces in Inner Mongolia[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 130-139.]

[26] 王俊枝, 萨日盖, 窦银银, 等. 2000—2022年鄂尔多斯高原人类活动对植被覆盖变化的影响[J/OL].西安理工大学学报, 1-10[2024-06-25]. [Wang Junzhi, Sa Rigai, Dou Yinyin, et al. Effects of human activities on vegetation cover change in the Ordos Plateau during 2000-2022[J/OL]. Journal of Xi'an University of Technology, 1-10[2024-06-25].]

[27] 贾龙, 扈吉萍, 吴文瑾, 等. 鄂尔多斯生态系统服务价值核算及其时空动态分析[J]. 自然保护地, 2024, 4(2): 95-107. [Jia Long, Hu Jiping, Wu Wenjin, et al. Accounting of Ordos ecosystem service value and its spatiotemporal dynamic analysis[J]. Natural Protected Areas, 2024, 4(2): 95-107.]

[28] 张保龙, 程文博, 赵宇新, 等. 植被NPP时空变化及其对气候变化的响应——以黄河内蒙古段为例[J]. 内蒙古气象, 2024, 1(1): 9-16. [Zhang Baolong, Cheng Wenbo, Zhao Yuxin, et al. Spatio-temporal variation of NPP and its response to climate change——A case study of the Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2024, 1(1): 9-16.]

[29] 常屹冉, 张弛, 魏嘉诚, 等. 气候变化和人类活动对内蒙古植被净初级生产力的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(11): 3444-3452. [Chang Yiran, Zhang Chi, Wei Jiacheng, et al. Impacts of climate change and human activities on the net primary productivity of vegetation in Inner Mongolia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11): 3444-3452.]

[30] Wu C Y, Chen K L, Chongyi E, et al. Improved CASA model based on satellite remote sensing data: Simulating net primary productivity of Qinghai Lake Basin alpine grassland[J]. Geoscientific

Model Development, 2022, 15(17): 6919-6933.

[31] 张雪蕾, 肖伟华, 王义成. 基于改进的CASA模型三峡库区NPP时空特征及气候驱动机制[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3488-3498. [Zhang Xuelei, Xiao Weihua, Wang Yicheng. Temporal-spatial variations of NPP and its climatic driving mechanism in the Three Gorges Reservoir Area based on modified CASA model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3488-3498.]

[32] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 46: 84-93.

[33] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424.]

[34] Tian H W, Ji X J, Zhang F M. Spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity and its response to meteorological factors across the Yellow River Basin during the period 1981-2020[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 949564.

[35] Xuan W X, Rao L Y. Spatiotemporal dynamics of net primary productivity and its influencing factors in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1043807.

[36] 韩梅, 邬晗, 韩柏, 等. 鄂尔多斯地区毛乌素沙地荒漠化形成因素及治理措施[J]. 农业与技术, 2021, 41(18): 111-115. [Han Mei, Wu Han, Han Bai, et al. The formation factors and control measures of desertification in Maowusu Sandy Land in Ordos region[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(18): 111-115.]

[37] 张丹丹. 基于多源数据的黄河流域植被NPP时空变化及其影响因子分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2019. [Zhang Dandan. Research on Spatio-temporal Variations in Vegetion Net Primary Productivity and Their Impact Factors in Yellow River Basin Based on Muti-source Data[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.]

[38] 黄露, 周伟, 李佳慧, 等. 内蒙古不同类型草地NPP时空动态特征及其气候影响因素分析[J]. 草原与草坪, 2019, 39(2): 1-9. [Huang Lu, Zhou Wei, Li Jiahui, et al. Analysis on spatial-temporal dynamics of different types grassland NPP and its climate influencing factors in Inner Mongolia[J]. Grassland and Turf, 2019, 39(2): 1-9.]

[39] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 等. 2000—2015年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 255-262. [Tian Zhihui, Zhang Dandan, He Xiaohui, et al. Spatiotemporal variations in vegetation net primary productivity and their driving factors in Yellow River Basin from 2000 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 255-262.]

[40] 王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区2004—2014年植被NPP时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095. [Wang Qiang, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan Mountain area from 2004 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3084-3095.]

[41] 贾路, 于坤霞, 邓铭江, 等. 黑河流域年NPP时空变化及其对气候因子的响应[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 523-540. [Jia Lu, Yu Kunxia, Deng Mingjiang, et al. Spatio-temporal changes of annual NPP in the Heihe River Basin and its response to climate factors[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 523-540.]

[42] 黄瑾依, 孙倩, 黄永刚, 等. 干旱区典型县植被覆盖度的动态变化和景观格局分析[J/OL]. 环境科学, 1-19 [2024-06-25]. [Huang Jinyi, Sun Qian, Huang Yonggang, et al. Landscape pattern and dynamic change of fractional vegetation cover in a typical country in Arid Region[J/OL]. Environmental Science, 1-19 [2024-06-25].]

[43] He P X, Ma X L, Han Z M, et al. Uncertainties of gross primary productivity of Chinese grasslands based on multi-source estimation[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 928351.

[44] Xiao J F, Davis K J, Urban N M, et al. Uncertainty in model parameters and regional carbon fluxes: A model-data fusion approach[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189/190: 175-186.

[45] Liu L Q, Gao X, Cao B H, et al. Comparing different light use efficiency models to estimate the gross primary productivity of a cork oak plantation in northern China[J]. Remote sensing (Basel, Switzerland), 2022, 14(22): 5905.

Spatiotemporal evolution of long-term vegetation NPP in Ordos based on GEE

LIU Ge[1,2], ZHAO Hengqian[1,2], HUANGFU Xiadan[2], FU Hancong[2], WANG Pan[2],
XU Fei[2], HAN Tian[2]

(1. Inner Mongolia Research Institute, China University of Minning and Technology (Beijing), Ordos 017010, Inner Mongolia, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Minning and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Utilizing the Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform, the Net Primary Productivity (NPP) of Ordos was calculated based on an improved CASA model. Sen's slope analysis and MK trend analysis methods were used to analyze the spatiotemporal changes in NPP from 2001 to 2020 and estimate the carbon sequestration capacity of Ordos City. (1) NPP in Ordos City displayed a significant seasonal variation from 2001 to 2020, with the highest values in July and August and an average annual NPP of 78.04 g $C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, following an overall fluctuating upward trend. (2) Spatially, NPP demonstrated clear heterogeneity, with higher values in the northeast and lower values in the northwest; high values were concentrated in Dalate Banner and Jungar Banner, while low values were mainly in Hanggin Banner. (3) The implementation of ecological projects and NPP changes were not fully synchronized, with a general trend of initially slow then accelerating growth; NPP change rates significantly increased after 2011 in most areas, but areas with harsher ecological conditions, such as Hanggin Banner, exhibited a lower improvement and some lag. (4) In 2011, Ordos displayed a widespread negative carbon sequestration rate. Yet, by 2020, the spatial heterogeneity in carbon sequestration had significantly increased, with higher values in the east and lower values in the west. The carbon sequestration capacity in Hanggin Banner's western region still requires reinforcement, while Dalate Banner significantly improved its carbon sequestration capacity.

Keywords: Ordos City; Google Earth Engine; CASA model; net primary productivity; carbon sequestration capacity